

## برآورد دبی انتقال رسوب رودخانه با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS

آزاده جباری<sup>۱</sup>، سید احمد حسینی<sup>۲</sup>، امیر حمزه حقی آبی<sup>۳</sup>، صمد امامقلی زاده<sup>۴</sup>، عبدالکریم بهنیا<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۲۵

### چکیده

برآورد مقدار بار رسوبی که یک جریان مشخص، قادر به حمل آن است یکی از موضوعات اصلی تحقیقات رسوب می‌باشد. رودخانه ابهرود یکی از رودخانه‌های مهم استان زنجان است که کشاورزی منطقه به آن وابسته می‌باشد. در پژوهش حاضر از مدل HEC-RAS 4.1، به منظور شبیه‌سازی جریان رسوبات رودخانه ابهرود استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از نقشه DEM این رودخانه با مقیاس ۱:۴۰۰۰، در بسته الحاقی Hec-GeoRas در نرم‌افزار Arc Map، تعداد ۷۳۰ مقطع در طول ۵۰ کیلومتر رودخانه تهیه شد و برای معرفی هندسه رودخانه به مدل (Hec-Ras) استفاده شد. همچنین با استفاده از دبی‌های حداکثر اندازه‌گیری شده با طول آماری ۳۳ ساله در ایستگاه هیدرومتری قروه، دبی با دوره بازگشت ۲۵ ساله با استفاده از نرم‌افزار HYFA محاسبه و برای شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه مورد استفاده قرار گرفت. پس از کالیبره نمودن مدل برای شرایط هیدرولیکی رودخانه و مدل‌سازی شرایط جریان شبه غیرماندگار، اطلاعات شرایط مرزی و دانه‌بندی مواد بستر رودخانه به مدل معرفی شد. با استفاده از رابطه‌های انتقال رسوب، ظرفیت انتقال رسوب رودخانه ابهرود محاسبه شد. مقایسه بین نتایج به‌دست‌آمده و داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که معادله یانگ (Yang) با داشتن خطای کمتری نسبت به سایر معادله‌ها، برآورد قابل قبول‌تری داشته است. بر این اساس پیشنهاد می‌شود جهت شناخت پتانسیل میزان انتقال رسوب از این مدل در مناطق مختلف رودخانه استفاده شود. همچنین بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه با استفاده از معیارهای هالستروم و شیلدز نشان می‌دهد که وضعیت هیدرولیکی جریان در طول رودخانه به‌گونه‌ای است که تمامی مقاطع رودخانه در وضعیت فرسایش می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ابهرود، رسوب‌گذاری، فرسایش، مدل HEC-RAS 4.1

۱. دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، ۹۸ ۹۱۲۷۱۶۷۹۱۱ + jabary.az@gmail.com (نویسنده مسئول)

۲. مربی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران، ۹۸ ۲۱ ۴۴۹۵۰۵۷۰۹ + sahosseini@yahoo.com

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، ۹۸ ۶۶۱ ۶۲۰۰۰۹۷ + haghiahi@yahoo.com

۴. دانشیار گروه آب و خاک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، ۹۸ ۲۷۴ ۵۲۲۲۶۹۱ + s\_gholizadeh517@yahoo.com

۵. استاد گروه هیدرولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، ۹۸ ۶۱۱ ۳۷۴۱۱۳۲ + behnia1322@yahoo.com

## مقدمه

رودخانه یک پدیده دینامیک می‌باشد که مدام در حال تغییر و جابجایی است. فرسایش و رسوب‌گذاری از پدیده‌های رایج در رودخانه‌ها می‌باشد. برای بررسی رفتار رودخانه و پیش‌بینی تغییرات احتمالی آینده، شناخت این پدیده در رودخانه‌ها دارای اهمیت می‌باشد. برای شناخت این پدیده تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است و روابط ریاضی مختلفی برای مدل کردن فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها به‌وسیله‌ی محققان مختلف ارائه شده است. در واقع برآورد بار رسوبی در بسیاری از پروژه‌های مهندسی همچون برنامه‌ریزی و طراحی منابع ذخیره آب، مورفولوژی و تغییرات بستر رودخانه، برآورد رسوب سالانه رودخانه، طراحی و نگهداری کانال‌های آبیاری پایدار، لایروبی کانال‌ها و ... حائز اهمیت می‌باشد (اجدادی و شوشتریان، ۱۳۸۷).

به‌منظور بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه مدل‌های ریاضی متعددی از جمله HEC-6، FLUVIAL، GSTAR، MIKE21، SSIM، HEC-RAS و غیره توسعه یافته است که با توجه به قابلیت‌ها و توانایی‌های مدل‌های ذکر شده از مدل HEC-RAS 4.1 به لحاظ کارایی بالا، کاربر پسند بودن مدل، دسترسی آسان و رایگان جهت بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه ابهرود استفاده شده است.

تحقیقات متعددی با استفاده از نسخه‌های مختلف مدل HEC-RAS به‌منظور مطالعات فرسایش و رسوب رودخانه‌ها و مخازن سدها انجام پذیرفته است که از جمله آن‌ها مطالعات گیبسون و همکاران (۲۰۰۶) است که قابلیت مدل HEC-RAS را برای محاسبات انتقال رسوب رودخانه مورد بررسی قرار دادند و نتایج این مدل را با مدل Hec-6 مقایسه کردند. ایشان نتیجه گرفتند مدل Hec-Ras در شبیه‌سازی‌ها به‌طور کلی به‌خوبی اجرا شده و نتایج این مدل در مقایسه با Hec-6 در شرایط خاصی، کمی متفاوت بوده که به دلیل تفاوت در هیدرولیک مدل می‌باشد. همچنین محققین مختلفی در ایران نیز از این مدل برای بررسی انتقال رسوب در رودخانه‌ها و مخازن سدها استفاده نموده‌اند که برای نمونه، تحقیقات امامقلی-زاده و همکاران (۱۳۸۹) می‌باشد که در پژوهشی به بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین

دره با استفاده از مدل Hec-Ras پرداختند و نتیجه گرفتند که در بین معادلات انتقال رسوب، تابع لارسن (کوپلند) در این رودخانه نسبت به سایر توابع انتقال رسوب، برآورد بهتری دارد. همچنین اکبری و همکاران (۱۳۹۰)، ترکیب‌های مختلف معادلات انتقال رسوب و روش‌های مختلف محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل Hec-Ras را در پیش‌بینی تغییر فرم بستر رودخانه بکار گرفتند و نتایج نشان داد که معادلات انتقال رسوب حساسیت چندانی به روش محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه ندارند و تفاوت عمده نتایج بستگی به نوع معادله انتقال رسوب دارد. پیرو و همکاران (۱۳۹۱)، نیز، در پژوهشی نشان دادند که حجم متوسط رسوب خروجی از رودخانه با استفاده از مدل Hec-Ras به‌خوبی قابل محاسبه می‌باشد. همچنین، احمدیان و ناصری قلقاچی (۱۳۸۹)، با بررسی معادلات انتقال رسوب با استفاده از مدل Hec-Ras نتیجه گرفتند که معادله لارسن، نتایج قابل قبول‌تری در برآورد رسوب رودخانه آجی‌چای دارد. پژوهش اسدی و همکاران (۱۳۹۰)، نیز نشان داد که از بین معادلات انتقال رسوب موجود در مدل Hec-Ras معادله میر-پیتر-مولر، در رودخانه تالار، بیشترین تطابق را با واقعیت دارد و می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات مقاطع در این رودخانه مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تا به حال هیچ‌گونه پژوهشی به‌منظور برآورد دبی انتقال رسوب رودخانه ابهرود انجام نشده است؛ بنابراین در پژوهش حاضر از مدل ریاضی HEC-RAS بدین منظور استفاده شد و با استفاده از داده‌های صحرایی اندازه‌گیری شده توانایی مدل مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت.

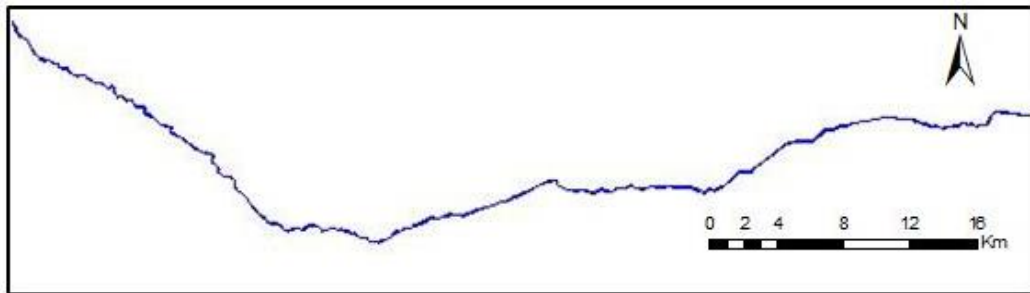
## مواد و روش‌ها

## محدوده مورد مطالعه

رودخانه ابهرود از شاخه‌های مهم و اولیه رودخانه شور می‌باشد که در شهرستان زنجان قرار دارد و یکی از سه رودخانه مهم استان زنجان است. این رودخانه از قسمت شرقی ارتفاعات جهان داغ که دارای ۲۳۸۰ متر ارتفاع بوده و در غرب و جنوب ابهر و سلطانیه قرار دارد سرچشمه می‌گیرد و بلوک ابهر قزوین را مشروب و همراه

در این تحقیق با استفاده از داده‌های دبی آب و رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه قروه در یک دوره زمانی ۲۷ ساله، از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۷۴ (۱۹۷۰ تا ۱۹۹۶)، روش‌های هیدرولوژیکی جهت انتخاب مدل بهینه مورد آزمون قرار گرفت و با در نظر گرفتن ۲۰٪ بار معلق به‌عنوان بار بستر، بار کل سالیانه محاسبه شد (حسینی، ۱۳۸۹). ایستگاه قروه معرف میزان آب‌دهی رودخانه ابهررود می‌باشد. پس از اجرای مدل HYFA و انتخاب بهترین روش توزیع (لوگ پیرسون ۳) با استفاده از روش گشتاور محدود (L-Moment) مقادیر دبی لحظه‌ای در این ایستگاه برای دوره بازگشت‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

رودخانه شور به دریاچه نمک می‌ریزد. این رودخانه در محدوده ورود به استان دارای حوضه‌ای به مساحت حدود ۱۹۳۰ کیلومتر مربع و در داخل استان محدوده سه راهی شامی شاپ دارای حوضه‌ای به مساحت ۲۵۳۰ کیلومتر مربع می‌باشد. مقدار آبی که در رودخانه ابهررود جریان دارد، در ایستگاه هیدرومتریک روستای قروه ۳۱۶ میلیون متر مکعب در سال اندازه‌گیری شده است. این رودخانه در شهرستان ابهر و در پایین‌ترین سطح شهر قرار دارد. نقشه پلان رودخانه ابهررود در شکل ۱ نشان داده شده است. محدوده مورد مطالعه برای رودخانه ابهررود از مرز استان قزوین و زنجان در بالادست پل ارتباطی بین دو روستای فارسنجین-طیوقچی در مختصاتی به طول جغرافیایی ۲۴° ۴۹' و عرض ۲° ۳۶' شروع و تا حوالی روستای ارداق در مختصاتی به طول جغرافیایی ۴۹° ۴۹' و عرض ۳° ۳۶' ادامه می‌یابد. طول رودخانه در محدوده مورد مطالعه در حدود ۴۷ کیلومتر می‌باشد.



شکل (۱): پلان رودخانه‌ی ابهررود

جدول (۱): مقادیر حداکثر دبی سالانه ( $m^3/s$ ) برآورد شده با دوره بازگشت‌های مختلف در ایستگاه قروه

دوره بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
حداکثر دبی سالانه	۳۴	۶۶	۹۴	۱۴۰	۱۸۲	۲۳۲	۲۹۰

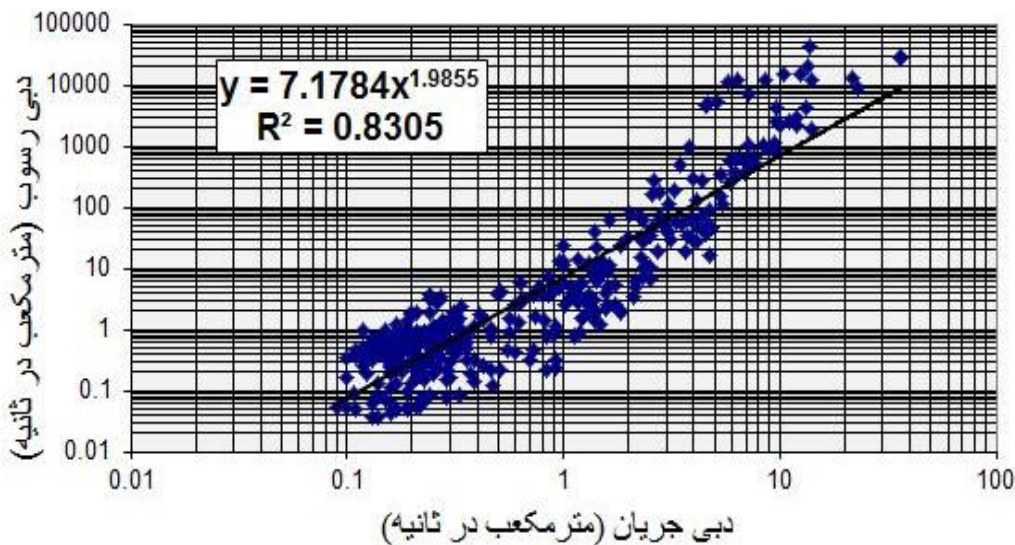
موجود این ایستگاه نشان داده شده است. با استفاده از این رابطه و آمار دبی روزانه ایستگاه آبرسنجی، مقادیر رسوب این ایستگاه در طول دوره آماری موجود تعیین شده است. میانگین سالانه رسوب مواد معلق رودخانه در محل ایستگاه آبرسنجی قروه، ۳۵۸۰۵ تن و مقدار دبی ویژه رسوب سالانه آن ۱۹ تن در کیلومترمربع درسال برآورد شده است.

رودخانه مورد مطالعه فاقد آماربرداری بار بستر می‌باشد و از آنجا که به‌طور معمول بار بستر در رودخانه‌های

تحلیل آمار رسوب موجود رودخانه ابهررود در محل ایستگاه آبرسنجی و رسوب‌سنجی منتخب (قروه) به‌منظور تعیین میزان بار رسوبی آن می‌باشد. با توجه به رابطه توانی بین مواد معلق رسوبی و دبی روزانه، آمار نمونه‌برداری رسوب مواد معلق جمع‌آوری و روابط بده - رسوب، به‌وسیله‌ی سه روش منحنی سنجه رسوب، FAO و پوش هم غلظت، در ایستگاه قروه محاسبه و در نهایت روش پوش هم غلظت به‌عنوان مناسب‌ترین روش، انتخاب شد که در شکل ۲ پراکندگی نمونه‌های

بستر حدود ۲۰ درصد بار معلق پیشنهاد می‌شود.

عمیق بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بار معلق را تشکیل می‌دهد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۹)، لذا در این مطالعه مقدار بار



شکل (۲): رابطه بین دبی و دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری قروه

هندسی برای بازه زمانی مربوطه به دست خواهد آمد. در مرحله بعد، همین روند محاسباتی برای بازه زمانی بعدی تکرار خواهد شد. برای محاسبه نرخ انتقال رسوب، روابط مختلفی در مدل پیش‌بینی شده است (یانگ، ایگرز-وایت، انگلند-هانسن، لارسن (کوپلند)، میر-پیتر و مولر، توفالتی و ویلکوک)<sup>۱</sup> تا کاربر رابطه مناسب برای رودخانه مورد مطالعه را از میان آن‌ها انتخاب کند. این مدل بر اساس معادلات جریان و انتقال رسوب و معادله پیوستگی رسوب در شرایط یک‌بعدی و فرض جریان شبه‌غیرمماندگار (Quasi Unsteady Flow) توسعه یافته است (لارنگ و ایجت، ۲۰۰۵). در مدل HEC-RAS 4.1.0 برای شبیه‌سازی یک بعدی ته‌نشین شدن رسوب و یا فرسایش و آب‌شستگی بستر از شش تابع مختلف استفاده می‌نماید (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

روندیابی رسوب با استفاده از معادله اکسرن (Exner) صورت می‌گیرد. معادله بقای جرم برای رسوب با توجه به معادله اکسرن به صورت معادله (۱) می‌باشد (اداره مهندسی ارتش آمریکا، ۲۰۱۰):

#### نرم‌افزار HEC-RAS 4.1.0

این مدل از رایج‌ترین مدل‌های رودخانه‌ای است که می‌تواند جریان متغیر تدریجی را با هر نوع مقطع عرضی در حالات دائمی و غیردائمی و انتقال رسوب را در مرز متحرک به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی نماید. این مدل به وسیله‌ی اداره مهندسی ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته و در آخرین نگارش خود علاوه بر قابلیت‌های قبلی توانایی تحلیل فرآیند رسوب، فرسایش و کیفیت را نیز دارا می‌باشد. در این مدل تغییرات پروفیل طولی بستر رودخانه را در اثر رسوب‌گذاری و فرسایش برای دوره‌های طولانی مدت شبیه‌سازی می‌شود. هنگام استفاده از این نرم‌افزار، سری پیوسته جریان به قطعه‌های جریان ماندگار بر اساس متغیرهای دبی و زمان تقسیم می‌شود. برای هر یک از قطعه‌های جریان ماندگار، پروفیل سطح آب محاسبه می‌شود و با استفاده از آن سرعت، شیب انرژی عمق و سایر پارامترها در هر یک از مقاطع عرضی به دست می‌آید. سپس نرخ انتقال رسوب در هر یک از مقاطع محاسبه می‌شود. این نرخ نشان‌دهنده میزان رسوب انتقالی از هر مقطع در طول زمان است. همچنین میزان رسوب‌گذاری و یا فرسایش در هر یک از مقاطع محاسبه خواهد شد و با استفاده از آن، تغییرات حاصل در مقاطع

1. Yang, Ackers and White, England and Hansen, Copeland's form of Laursen, Meyer, Peter and Muller, Toffaleti and Wilcock.

نرم افزار Arc Map، تعداد ۷۳۰ مقطع در طول ۵۰ کیلومتر رودخانه تهیه شد. پس از تهیه مقاطع عرضی و برداشت فواصل سواحل چپ و راست کانال اصلی (Main Channel) اطلاعات مربوطه به صورت فایل GIS جهت معرفی هندسه رودخانه به مدل Hec-Ras ارتباط داده شد. شکل ۳ نیمرخ طولی رودخانه ابهررود و نمونه مقطع عرضی آن را در مدل Hec-Ras نشان می‌دهد.

ضرایب همگرایی و واگرایی برای ارزیابی افت انرژی که به علت وجود بازشدگی و تنگ‌شدگی در جریان رخ می‌دهد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ضرایب در تغییرات بار سرعت از یک مقطع عرضی تا مقطع عرضی بعدی ضرب می‌شوند تا افت‌های بین آن مقاطع، در محاسبات لحاظ شود. در حالت کلی افت انرژی در بازشدگی‌ها، بیشتر از تنگ‌شدگی‌ها می‌باشد. با توجه به تغییرات طبیعی مقاطع رودخانه ابهررود و با توجه به مقادیر ضرایب همگرایی ( $C_c$ ) و واگرایی ( $C_e$ ) مقطع که برای شرایط مختلف به وسیله انجمن مهندسی ارتش امریکا پیشنهاد شده است در مطالعه حاضر ضرایب همگرایی و واگرایی به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ در نظر گرفته شد.

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (1)$$

که در آن:

B: عرض رودخانه (متر)

H: ارتفاع کف بستر رودخانه (متر)

$\lambda_p$ : تخلخل لایه فعال

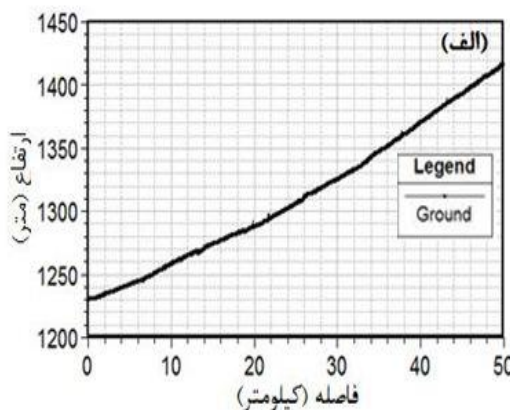
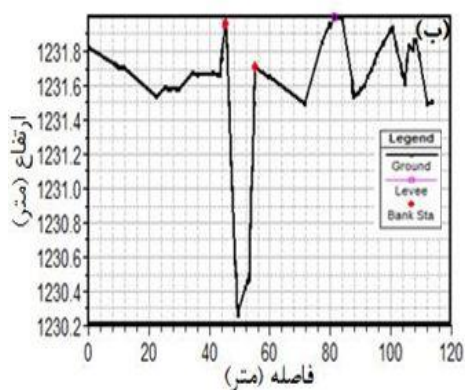
$Q_s$ : دبی بار رسوبی حمل شده (مترمکعب بر ثانیه)

X: فاصله (متر)

t: زمان (ثانیه) می‌باشد.

### مدل سازی هیدرولیک جریان رودخانه

به منظور استفاده از این مدل برای شبیه سازی هیدرولیک جریان و رسوب، اطلاعات رودخانه شامل داده های هندسی، داده های هیدرولیکی و داده های رسوبی بکار گرفته می شود. در بخش هندسی پلان عمومی رودخانه همراه با مقاطع عرضی به مدل معرفی می شوند. بدین منظور با استفاده از نقشه DEM رودخانه ابهررود با مقیاس ۱:۴۰۰۰، در بسته الحاقی HecGeoRas



شکل (۳): (الف) نیمرخ طولی رودخانه مورد مطالعه (ب) مقطع عرضی رودخانه در ایستگاه قروه

معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه (حسینی و ابریشمی، ۱۳۷۸) ارائه شده، می‌توان ضریب زبری را در بازه‌های مختلف به شرح جدول ۲ در نظر گرفت.

افت طولی ناشی از زبری یکی از عمده افت‌های انرژی در رودخانه می‌باشد و نقش مؤثری در تراز آب و سرعت جریان در هر مقطع دارد. تعیین ضریب زبری مناسب که معرف شرایط واقعی رودخانه باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در رودخانه ابهررود با توجه به بازدهی و جدول‌های معتبر تهیه شده توسط دفتر تحقیقات و

به‌عنوان شرایط مرزی برای رودخانه ابهرود، در نظر گرفته شده است. بر این اساس پس از وارد کردن اطلاعات ورودی به مدل Hec-Ras، این مدل برای دبی‌های ارائه شده در جدول ۱ اجرا شده و با توجه به اهمیت دبی طراحی در طرح‌های حفاظت رودخانه (دبی با دوره بازگشت ۲۵ ساله) شرایط جریان در این دبی در شرایط طبیعی رودخانه ابهرود، بررسی شده است. جدول ۳ به‌طور خلاصه پارامترهای جریان را برای رودخانه ابهرود در دبی طراحی نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ تغییرات پارامترهای جریان را در طول رودخانه در دبی ۲۵ ساله نشان می‌دهد.

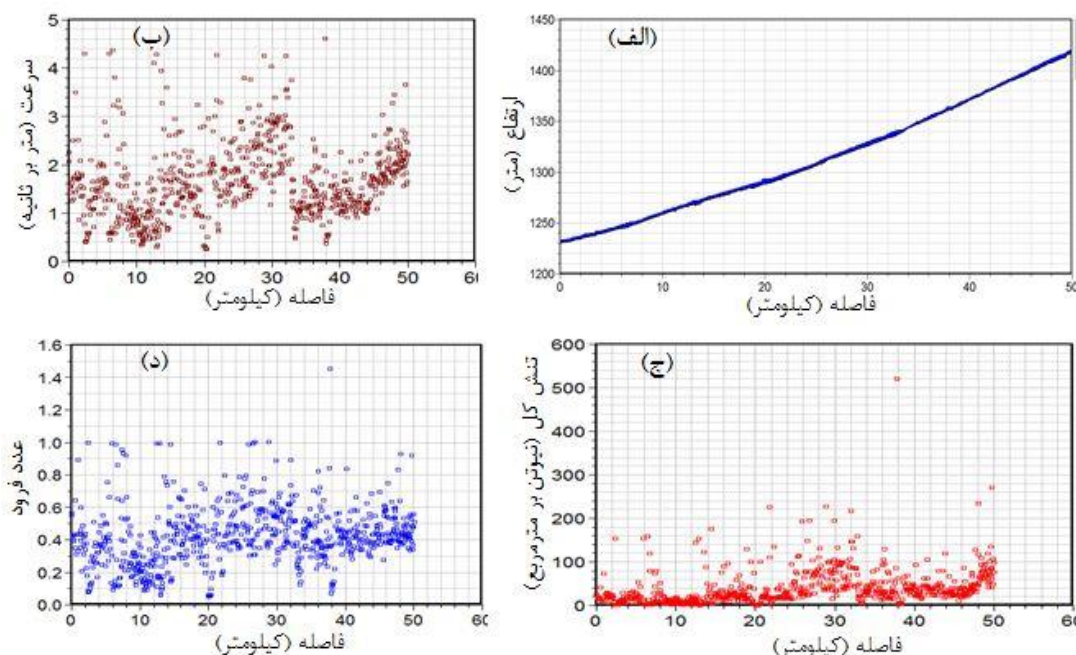
جدول (۲): ضریب مانینگ ابهرود با استناد به جداول معتبر

بازه	n
بازه اول ۰-۱۴km	۰/۰۵
بازه دوم ۱۴-۳۴km	۰/۰۳۹
بازه سوم ۳۴-۵۰km	۰/۰۳۲

برای پیش‌بینی مشخصه‌های جریان در بازه‌ای از رودخانه نیاز به شرایط مرزی منطبق با طبیعت می‌باشد. شرایط مرزی معرف وضعیت ورودی و خروجی جریان در بالادست و پایین‌دست بازه مورد مطالعه می‌باشد. برای انجام محاسبات، تراز عمق نرمال (Normal Depth)

جدول (۳): خلاصه نتایج محاسبات هیدرولیکی در دبی طراحی رودخانه ابهرود در مقاطع مختلف

پارامتر	سطح جریان	عرض سطح آب	سرعت جریان	تنش برشی	شیب انرژی	عدد فرود
واحد	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m/s)	(N/m <sup>2</sup> )	(m/m)	-
محدوده پارامتر	۳۱/۲۴-۳۲۸/۱۶	۱۷/۸۴-۵۵۳/۰۲	۰/۴۳-۴/۴۸	۱/۶۸-۳۰۹/۶۳	۰/۰۰۰۴-۰/۰۳۵	۰/۰۷-۱/۱۴



شکل (۴): الف) تغییرات نیم‌رخ سطح آب (ب) سرعت متوسط جریان (ج) تنش برشی (د) عدد فرود

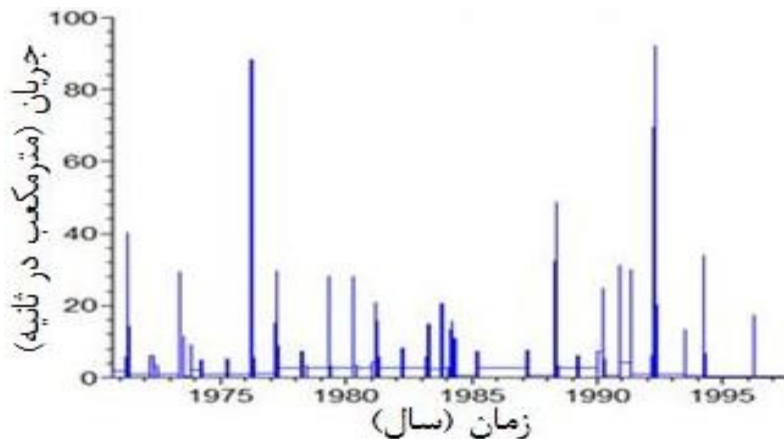
مصالح بستر رودخانه در بازه‌های مختلف (در بستر سیلابی و بستر اصلی رودخانه)، منحنی سنج‌رسوب در بازه‌ی بالادست رودخانه، انتخاب نوع معادله انتقال رسوب و

#### مدل‌سازی هیدرولیک رسوب رودخانه

اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار Hec-Ras جهت شبیه‌سازی انتقال رسوب و فرسایش رودخانه شامل دانه‌بندی

هیدروگراف جریان ورودی را در ایستگاه قروه نشان می‌دهد. از آنجا که بعضی از روش‌های محاسبه سرعت سقوط ذرات رسوبی مانند رابطه رابی (Ruby) نیاز به دمای آب دارند، اطلاعات مربوط به دمای آب نیز وارد مدل شد.

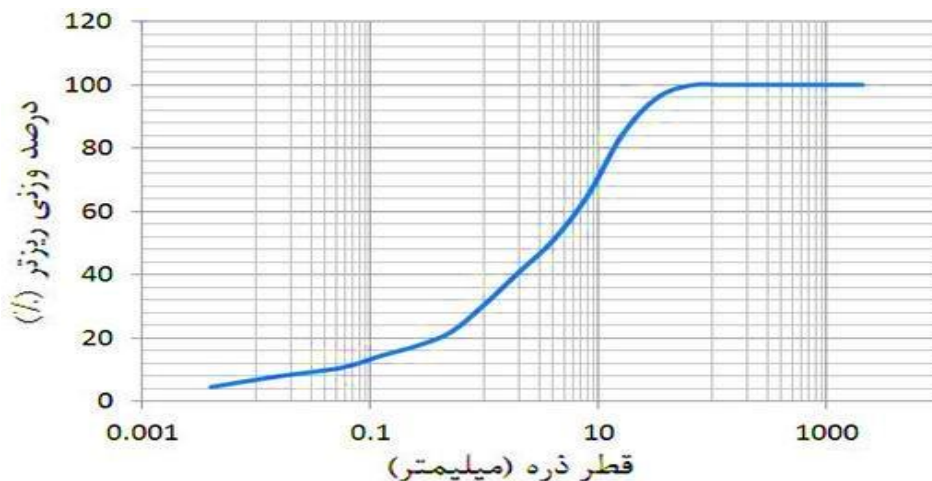
انتخاب نوع معادله سرعت سقوط ذرات می‌باشد. جهت تعیین جریان شبه غیرماندگار در مدل، شرایط مرزی بالادست به صورت سری‌های زمانی جریان (Flow series) برای یک دوره ۲۷ ساله (۱۹۹۶-۱۹۷۰) و عمق نرمال به عنوان شرط مرزی پایین دست وارد مدل شد. شکل ۵



شکل (۵): هیدروگراف جریان ورودی در ایستگاه هیدرومتری قروه

مطالعات میدانی و نتایج مطالعات زمین‌شناسی رودخانه مورد مطالعه، حداکثر میزان عمق فرسایش برابر با ۳ متر انتخاب و این مقدار به مدل وارد شد. به منظور ورود اطلاعات مربوط به مواد رسوبی رودخانه، در ۹ مقطع رودخانه، نمونه‌گیری انجام شد و پس از تعیین دانه‌بندی رسوب، آن‌ها، به مدل معرفی شدند. در شکل ۶ نمونه منحنی دانه‌بندی معرفی شده به مدل، نشان داده شده است. شرط مرزی رسوب به صورت یک منحنی سنج رسوب، که ارتباط بین دبی جریان و دبی رسوب را به دست می‌دهد به مدل تعریف شد.

سرعت ته‌نشینی (Fall velocity) با توجه به اندازه ذرات و وزن مخصوص آن و ضریب لزجت سینماتیک سیال محاسبه می‌شود. نظر به اینکه تفاوت اصلی فرمول‌های سرعت سقوط ذرات مربوط به میزان ذرات ریزدانه و همچنین میزان چسبندگی و کلوئیدی بودن آن ذرات می‌باشد، لذا از رابطه رابی در تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات استفاده شد. عرض محدوده بازه فرسایش‌پذیر در هر مقطع، معادل با عرض محدوده مقطع اصلی جریان که در مطالعات هیدرولیک رودخانه تعیین شده بود، انتخاب و به مدل وارد شد. با توجه به



شکل (۶): نمونه منحنی دانه‌بندی ذرات رسوبی بستر معرفی شده به مدل

مدل اجرا گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهد که ظرفیت حمل رسوب در بازه مورد مطالعه رودخانه ابهررود، با انتخاب روابط مختلف، متغیر می‌باشد. جدول ۴ مقایسه کمی بین دبی رسوب محاسبه شده حاصل از اجرای مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده رودخانه ابهررود را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل، مقادیر رسوبات محاسبه شده به وسیله‌ی رابطه یانگ به‌عنوان مناسب‌ترین رابطه انتخاب شد. شکل ۷ تغییرات حجم رسوب خروجی در ایستگاه قروه با استفاده از تابع انتقال یانگ را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همچنین شکل ۸ تغییرات متوسط ظرفیت انتقال رسوب در طول رودخانه در روش یانگ و شکل ۹ متوسط تغییرات رقوم بستر را در دوره ۲۷ ساله شبیه‌سازی نشان می‌دهند. نتایج نشان داد در طی این دوره، حجم متوسط رسوب خروجی از این رودخانه حدود ۱/۵۱ میلیون تن در سال می‌باشد.

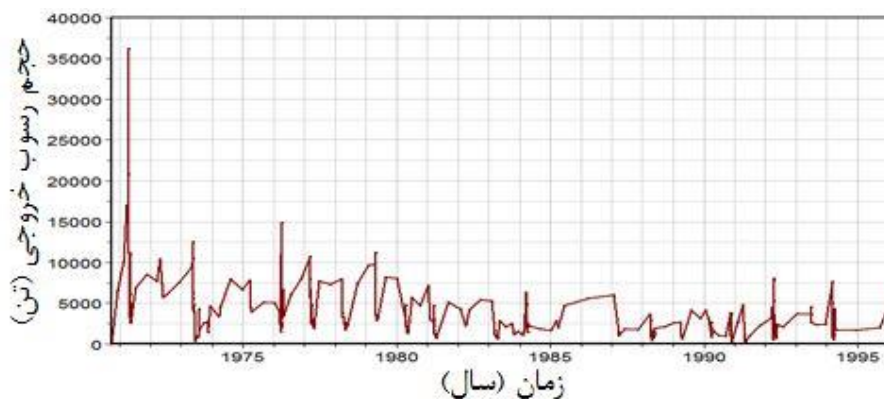
با توجه به اینکه نمودار هالستروم (هالستروم، ۱۹۳۵)، آنالیز دقیقی بر روی داده‌های به دست آمده از بررسی حرکت دانه‌های یکنواخت در کانال‌ها ارائه داده است از این معیار به‌منظور تعیین وضعیت فرسایشی، رسوب‌گذاری و یا انتقال رسوب در طول رودخانه مورد مطالعه در دبی ۲۵ ساله استفاده شد. همچنین با داشتن شرایط هیدرولیکی رودخانه، تنش برشی و سرعت برشی و با استفاده از مشخصات مصالح بستر عدد شیلدز و عدد رینولدز مرزی محاسبه و براساس منحنی شیلدز وضعیت حرکت مصالح بستر در دبی طراحی مشخص شد.

### بحث و نتایج

پس از ورود داده‌های جریان شبه غیرماندگار و اطلاعات رسوب رودخانه ابهررود، با انتخاب توابع انتقال رسوب موجود در مدل (یانگ، ایکرز-وایت، انگلند-هانسن، لارسن (کوپلند)، میر-پیتر و مولر، توفالتی و ویلکوک)

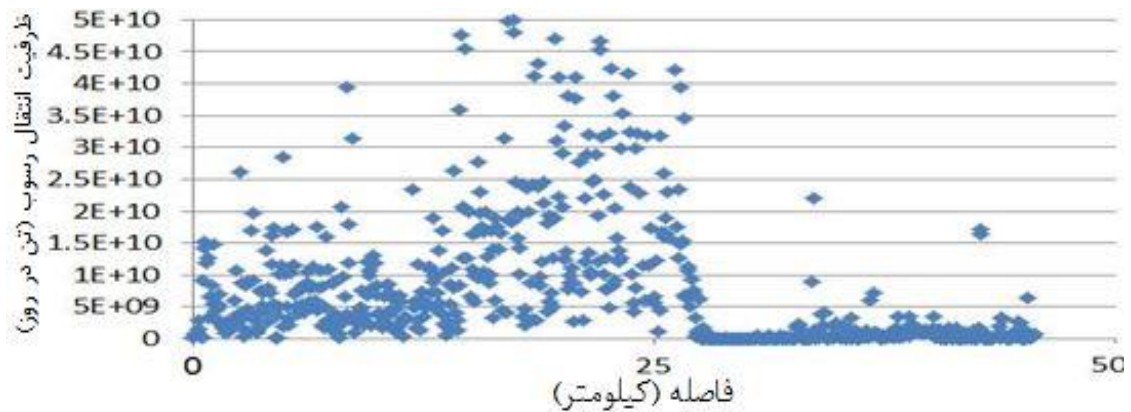
جدول (۴): مقایسه کمی نتایج حاصل از اجرای مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده رودخانه ابهررود

رابطه انتقال رسوب	دبی رسوب محاسبه شده (میلیون تن در سال)	دبی رسوب اندازه‌گیری درصد خطا در مقایسه با دبی رسوب اندازه‌گیری
یانگ	۱/۵۱	-۰/۱
ایکز-وایت	۰/۰۰۵	۱/۱۸
انگلند-هانسن	۲۲/۹۲	-۱۸/۲۴
لارسن (کوپلند)	۶/۰۴	-۳/۹۳
میر-پیتر و مولر	۰/۱۷	۱۰۳/۶
توفالتی	۲/۱۰	-۵۹/۶
ویلکوک	۰/۱۵	۱۰۵/۶۷

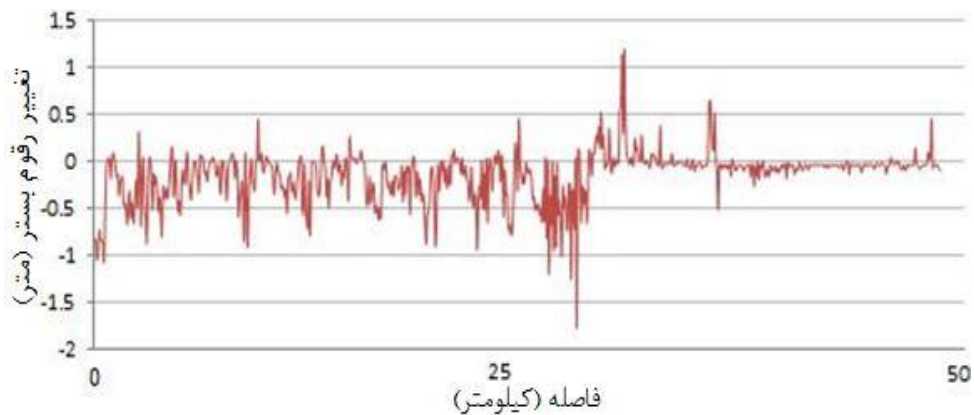


شکل (۷): تغییرات حجم رسوب خروجی در ایستگاه قروه با استفاده از تابع انتقال یانگ در دوره شبیه‌سازی





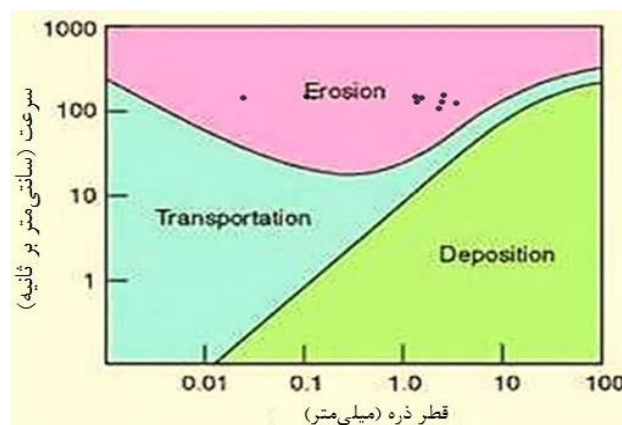
شکل (۸): تغییرات متوسط ظرفیت انتقال رسوب در طول رودخانه در دوره شبیه‌سازی



شکل (۹): مقادیر متوسط تغییر رقوم بستر در محل مقاطع عرضی رودخانه ابهرود

شیلدز نشان داد در تمام مقاطع (به جز مقطع کیلومتر ۸/۱۸۲) مقدار عدد رینولدز برشی بزرگ‌تر از ۴۰۰ و مقدار پارامتر شیلدز بزرگ‌تر از ۰/۰۵۶ می‌باشد، به عبارت بهتر بر اساس معیار شیلدز نیز تمام مقاطع رودخانه ابهرود در حالت فرسایش می‌باشند.

به‌منظور تعیین وضعیت فرسایش، رسوب‌گذاری و یا تعادل رودخانه با استفاده از نتایج اجرای مدل با دبی ۲۵ ساله رودخانه و تعیین سرعت متوسط جریان در ۹ مقطع نمونه‌برداری شده از نمودار هالستروم مطابق شکل ۱۰ استفاده شد. با توجه به این شکل هر ۹ مقطع رودخانه در وضعیت فرسایشی می‌باشند. همچنین بررسی با معیار



شکل (۱۰): وضعیت مقاطع رودخانه در نمودار هالستروم (هالستروم، ۱۹۳۵)

## نتیجه‌گیری

بررسی هفت تابع انتقال رسوب (یانگ، ایکرز-وایت، انگلند-هانسن، لارسن، میر-پیتر و مولر، توفالتی و ویلکوک) در مدل Hec-Ras 4.1 نشان‌دهنده ظرفیت انتقال رسوب متفاوت رودخانه ابهررود در این توابع می‌باشد و به‌طور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی میزان رسوب خروجی در طول رودخانه نشان‌دهنده برتری رابطه یانگ با داشتن درصد خطای کمتر (۰/۱ درصد) نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. دلیل این خطای جزئی در روش یانگ و اختلاف ناچیز بین نتایج محاسبه شده از این روش و مقادیر اندازه‌گیری شده، این است که معادله یانگ در محاسبه بار رسوب کل، بار عبوری از ناحیه غیرقابل اندازه‌گیری را نیز شامل می‌شود، درحالی‌که بیشتر اندازه‌گیری‌های انجام شده در رودخانه‌های طبیعی شامل میزان رسوب عبوری از ناحیه مذکور نمی‌شوند و لذا دلیل اصلی وجود خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. نتایج مطالعات انجمن مهندسين عمران آمریکا (ASCE) و سازمان

زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (U.S.G.S) نیز نشان داده است که روش یانگ در تعیین بار کل رسوب بیشترین دقت را دارا می‌باشد (یانگ، ۱۹۹۶).

بررسی تغییرات ظرفیت انتقال رسوب در طول رودخانه، نشان می‌دهد در بالادست رودخانه ظرفیت حمل رودخانه بیشتر از پایین‌دست می‌باشد. از آنجا که روش یانگ براساس توان جریان است که متناسب با سرعت جریان و شیب آبراهه می‌باشد، بنابراین با کاهش شیب به سمت پایین‌دست رودخانه (از حدود ۰/۰۰۴ به حدود ۰/۰۰۲) ظرفیت انتقال رسوب رودخانه کاهش می‌یابد. با توجه به تغییرات رقوم بستر رودخانه، حداکثر تغییر حدود ۱/۷ متر و متوسط تغییرات در حدود ۰/۲ متر در طول مسیر رودخانه می‌باشد.

با توجه به نمودار هالستروم و اعمال شرایط مقاطع نمونه با سرعت متناظر با دبی ۲۵ ساله در این نمودار و همچنین استفاده از منحنی شیلدز، فرسایشی بودن مقاطع رودخانه، مورد تایید قرار می‌گیرد.

## منابع

۱. احمدیان، م. و ر. ناصری قلقاچی. ۱۳۸۹. تعیین مناسب‌ترین معادله برای برآورد با رسوبی رودخانه مطالعه موردی: رودخانه آجی‌چای. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تربیت مدرس.
۲. اسدی، ف.، ر. فضل‌اولی، ع. عمادی و م. اسدی. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی هیدرولیک رسوب در رودخانه با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS4.0 (مطالعه موردی: رودخانه تالار). سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۳. اکبری، غ.، م. فغفور مغربی و ص. تارم. ۱۳۹۰. بررسی ترکیب معادلات انتقال رسوب و روش‌های محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۴. امامقلی‌زاده، ص.، س. شیردل، م. گنجویان، م. محمدیون و م. فتحی‌مقدم. ۱۳۸۹. بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی Hec-Ras. مجله مهندسی آب، سال اول، شماره (۱)، ص ۳۴-۱۹.
۵. پیرو، م.، م. قمشی، ا. نوحانی و م. روانسالار. ۱۳۹۱. بررسی وضعیت رسوب بستر رودخانه با مدل عددی HEC-RAS.4. مطالعه موردی رودخانه بشار یاسوج. همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها). دانشگاه شهرکرد.
۶. جوان‌اجدادی، م. و م. محمودیان شوشتری. ۱۳۸۷. برآورد بارمعلق رسوب با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی و مقایسه با نتایج روش اینشتین (مطالعه موردی: رودخانه بالخلی چای، ایستگاه سامیان اردبیل). سومین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه تبریز.
۷. حسینی، س.م. و ج. ابریشمی. ۱۳۷۸. هیدرولیک کانال‌های باز. دانشگاه امام رضا (ع). ۶۱۳ صفحه.
۸. حسینی، س.ا. ۱۳۸۹. گزارش برداشت مصالح رودخانه‌ای در محدوده رودخانه‌های خررود و ابهررود. شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس. ۳۰۷ صفحه.

۹. شفافی بجستان، م. ۱۳۸۹. اصول نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۵۸۶ صفحه.

10. Gibson, S., G. Brunner, S. Piper, and M. Jensen. 2006. Sediment transport computations with HEC-RAS. Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC), April 2-6, Reno, NV, USA.
11. Lorang, M.S. and G. Aggett. 2005. Potential sedimentation impacts related to dam removal: Icicle Creek, Washington, U.S.A.
12. USACE. 2010. HEC-RAS River Analysis System, Reference Manual for Version 4.1.0 Report CPD-69, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
13. Yang, C.T. 1996. Sediment Transport, Theory and Practice, Ottawa University, Mc-Grow Hill, 412p.

## Prediction of the sediment load in the river by HEC-RAS

Azadeh Jabary<sup>1</sup>, Seyed Ahmad Hosseini<sup>2</sup>, Amir hamzeh Haghiabi<sup>3</sup>, Samad Emamgholizadeh<sup>4</sup>, Abdolkarim Behnia<sup>5</sup>

### Abstract

Estimation of the sediment load which a specific flow is capable to transport, is one of the main topics of sediment researches. Abhar Rood River is one of the major rivers in Zanjan province which plays a big role in the agriculture of the region. In the present research, HEC-RAS 4.1 model is utilized to simulate the sediment hydraulic in Abhar Rood River. For this purpose, 730 sections along 50 km of Abhar Rood have been prepared by using the DEM map of the river (map scale 1:4000) in Hec-GeoRas extension of ArcMap, thereafter it was used to introduce the river geometry information to Hec-RAS model. Also the discharge amount with 25 years return period has been calculated in HYFA model using the 33 years flooding discharge data which was measured at the Ghorveh hydrometric station and used to simulate hydraulic flow of the Abhar Rood River. After calibrating the model for hydraulic conditions of the river, sediment boundary condition and bed gradation have been defined in model. Thereafter the sediment transport capacity of the river was calculated by transport functions at total cross sections. The comparison between the achieved results and measured data shows that, the Yang equation has minimum error compared with other equations. Therefore Yang equation due to its acceptable results is recommended to recognize the sediment transport capacity potential. In addition, to investigate the erosion and sedimentation status of Abhar Rood River, Hjulstrum and Shields criteria have been utilized. The hydraulic condition of this river shows the erosion status at the whole crosses of the river.

**Keywords: Abhar Rood, Erosion, HEC-RAS 4.1, Sedimentation**

---

1. Ph.D Student of Hydro-Structure Engineering, Department of Water Engineering, Lorestan University; jabary.az@gmail.com

2. Instructor, River Engineering Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute; sahosseini@yahoo.com

3. Associate Professor, Water Engineering Department, Lorestan University; haggiabi@yahoo.com

4. Associate Professor, Water and Soil Department, Shahrood University of Technology; s\_gholizadeh517@yahoo.com

5. Professor, Hydrology Department, Shahid Chamran University; behnia1322@yahoo.com